Journal of Horticultural Science
https://jhs.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 3, Fall 2022, p. 683-691

The Effect of Gamma Amino Butyric Acid on Improving Dehydration Stress Tolerance in *Portulaca oleracea*

N. Zeinali Pour[1,2*], F. Aghebati[3]

Received: 18-11-2021 Revised: 04-12-2021 Accepted: 09-01-2022 Available Online: 25-11-2022	**How to cite this article:** Zeinali Pour, N., & Aghebati, F. (2022). The Effect of Gamma Amino Butyric Acid on Improving Dehydration Stress Tolerance in *Portulaca oleracea*. *Journal of Horticultural Science 36*(3): 683-691. (In Persian with English abstract) **DOI**: 10.22067/jhs.2022.73535.1106

Introduction

Portulaca oleraceae is used in many countries for a variety of purposes, including human nutrition and the conversion and pharmaceutical industries. The edible parts of *Portulaca oleracea* are the young organs, especially the brittle leaves and stems. Over time, this medicinal herb has been forgotten. Drought, on the other hand, is a factor in the decline of crops and horticulture around the world. Given the vastness of arid and semi-arid regions in Iran and also the reduction of access to water resources, appropriate arrangements should be made for the optimal use of water in the agricultural sector. Changing the planting pattern and using useful and resistant alternative species such as drought-tolerant medicinal plants can enable the optimal use of limited water resources. GABA is an important non-protein amino acid that plays a positive role in increasing plant resistance to stress.

Materials and Methods

This experiment was carried out in 2020 as a factorial based on a completely randomized design with three replications in the vegetable research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman. Experimental treatments included different levels of GABA (0, 20, and 40 mM). Treatment with different concentrations of GABA was done in two stages of 6 and 12 leaves of *portulaca oleracea* and foliar application and application of dehydration stress in three levels of control, medium and severe at irrigation intervals of 7, 14, and 21 days from 6 leaf stage of plants to the end.

Results and Discussion

According to the analysis of variance, the effect of GABA at different concentrations and dehydration stress on plant height was significant at the level of 5% probability. Based on the mean comparison test, the highest plant height was obtained in GABA treatment of 40 mM and irrigation intervals of 7 days (control), and the lowest of this trait was obtained in GABA zero treatment and irrigation intervals of 21 days (highest stress level). The results of analysis of variance showed that the effect of GABA at different concentrations and dehydration stress on vegetative yield was significant, the interaction between irrigation intervals and GABA was significant at 5% level. Based on the mean comparison test, the highest vegetative yield was obtained in GABA treatment of 40 mM and irrigation intervals of 7 days and the lowest in control treatment and irrigation intervals of 21 days. According to the results of the analysis of variance table, the effect of GABA at different concentrations and dehydration stress on the amount of malondialdehyde was significant at the level of 1% probability. Based on the means comparison test, the highest amount of this trait was obtained in the control treatment. Comparison of the mean of the data showed that the effect of GABA at different concentrations and dehydration stress caused a significant difference in the probability level of 1% in the proline content of the data. Based on the mean

1 and 3- Assistant Professor and M.Sc. Graduate, Department of Horticultural Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, respectively.
2- Assistant Professor of Research and Technology Institute of Plant Production, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
(*- Corresponding Author Email: nzeinali@uk.ac.ir)

comparison test, the highest amount of proline was observed in GABA treatment of 40 mM and irrigation intervals of 21 days and the lowest amount was observed in control treatment and irrigation intervals of 7 days. As can be seen in the comparison table of means, the highest activity of superoxide dismutase enzyme was obtained in GABA treatment at 40 mM and irrigation intervals of 14 days and the lowest in control treatment and irrigation intervals was 7 days (Table 2). The results of this study showed that the effect of GABA at different concentrations and dehydration stress on the activity of catalase was significant at the level of 1% probability. As can be seen in the comparison table of means, the highest level of catalase activity was 40 mM in GABA treatment and 21 days irrigation intervals and the lowest in GABA treatment was 40 mM and irrigation intervals were 7 days.

Conclusion

The results of this study indicate that GABA is able to greatly alleviate the oxidative stress caused by dehydration in *Portulaca oleracea*. This effect is quite evident in oxidative parameters, especially the activity of antioxidant enzymes. The concentration of 40 mM GABA was the most effective treatment in mitigating the effects of irrigation. The results show that the use of GABA makes *Portulaca oleracea* tolerant to dehydration stress.

Keywords: Carbohydrates, GABA, Proline, Soluble sugars, Superoxide dismutase

نشریه علوم باغبانی
https:// jhs.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص. ۶۹۱-۶۸۳

تأثیر گاما آمینو بوتیریک اسید بر بهبود تحمل به تنش کم آبی در سبزی خرفه (*Portulaca oleracea*)

نجمه زینلی‌پور[۱و۲]*- فاطمه عاقبتی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

چکیده

کمبود آب از تنش‌های مهم غیرزیستی است که رشد گیاه و تولید محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پژوهش جهت بررسی اثر تیمار گابا (گاما آمینو بوتیریک اسید) در غلظت‌های مختلف بر عملکرد رویشی و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی سبزی دارویی خرفه به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار در گلخانه سبزی‌کاری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. تیمارهای استفاده شده در این آزمایش شامل؛ فواصل آبیاری هر ۷ روز (شاهد)، هر ۱۴ روز (تنش متوسط) و هر ۲۱ روز یکبار (تنش شدید) در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی با گابا در سه سطح صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار در کرت‌های فرعی بودند. پارامترهایی از جمله؛ ارتفاع بوته، عملکرد رویشی، درصد رطوبت نسبی برگ، میزان پرولین، قندهای محلول، مالون‌دی‌آلدئید، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که تیمار ۴۰ میلی‌مولار گابا و در تنش با دور آبیاری هر ۲۱ روز یکبار موجب حفظ بهتر میزان عملکرد رویشی حدود (۱۹ درصد)، ارتفاع بوته (۳۴ درصد)، رطوبت نسبی برگ (۱۴ درصد)، پرولین برگ (۱۱ درصد) و قندهای محلول (۴۵ درصد) در مقایسه با گیاهان شاهد که گابا دریافت نکرده بودند، شد. همچنین هر دو غلظت کاربردی گابا فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را در مقایسه با شاهد در همه سطوح آبیاری به کار رفته ارتقاء بخشیدند. بنابراین کاربرد ترکیب زیستی گاما آمینو بوتیریک اسید (گابا) سبب تعدیل اثرات مخرب تنش کم آبی بر سبزی خرفه شده است. در نهایت استفاده از گابای۴۰ میلی‌مولار برای افزایش و حفظ بهتر پارامترهای کمی و کیفی خرفه و ایجاد مقاومت به تنش کم آبی در این گیاه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پرولین، سوپراکسید دیسموتاز، قندهای محلول، کربوهیدرات، گابا

مقدمه

گیاه خرفه *Portulaca oleraceae* در بسیاری از کشورهای دنیا برای اهداف گوناگون از جمله تغذیه انسان و صنایع تبدیلی و دارویی کاربرد دارد. قسمت‌های خوراکی خرفه، اندام‌های جوان به ویژه برگ‌ها و ساقه‌های ترد می‌باشند که مزه‌ای شبیه به اسفناج دارند، ولی از بسیاری جهات بر اسفناج ارجح است و در طی زمان این سبزی دارویی به دست فراموشی سپرده شده است (Afshar *et al*., 2006).

ایران یکی از مراکز مهم پیدایش و تنوع ژنتیکی سبزی دارویی خرفه می‌باشد (Hasandokht, 2012). این گیاه دارای مقادیر قابل توجهی پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن می‌باشد، به علاوه منبع غنی و سرشاری از آنتی اکسیدان، ویتامین‌های آ، ب، ث و بتاکاروتن است (Okafor *et al*., 2014).

از سویی دیگر، خشکی از عوامل کاهش محصولات زراعی و باغی در سراسر جهان به حساب می‌آید. با توجه به وسعت نگران کننده مناطق خشک و نیمه خشک در ایران (۹۰٪ کل مساحت کشور) و همچنین کاهش یافتن دسترسی به منابع آب، بایستی تمهیدات مناسبی برای استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی اندیشیده شود. تغییر الگوی کاشت و استفاده از گونه‌های مفید و مقاوم جایگزین از جمله گیاهان دارویی متحمل به تنش خشکی می‌تواند امکان استفاده بهینه از منابع محدود آبی را فراهم سازد (Jami-al-ahmadi *et al*., 2004). در اثر شرایط تنش خشکی،

۱ و ۳- به‌ترتیب استادیار و دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۲- استادیار پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: nzeinali@uk.ac.ir
DOI: 10.22067/jhs.2022.73535.1106

فعالیت‌های فتوشیمیایی گیاه بازداشته می‌شود، محتوای کلروفیلی برگ تغییر می‌کند و فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین در فرآیند فتوسنتز کاهش می‌یابد (Monakhova and Chernyadev, 2002). تنش کم آبی و محدودیت‌های رطوبتی روی ساختار غشاء و فرآیندهای غشایی، ساختمان کلروپلاست و فعالیت آنزیم‌ها در سطح سلولی تأثیر می‌گذارد و از سوی دیگر باعث کاهش رشد و میزان عملکرد گیاه و افزایش حساسیت به تنش‌های دیگر نیز می‌گردد (Chevone *et al*., 1990). گابا یک اسید آمینه غیر پروتئینی مهم است که توانایی تنظیم pH سیتوسل را از طریق مصرف نیتروژن و تحریک چرخه کربس دارد و همچنین نقش مثبتی در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌ها دارد (Verbruggen and Hermans, 2008). سیستم متابولیزم گابا در پاسخ به شرایط فیزیولوژیکی از جمله تنظیم pH سلول، نسبت کربن به نیتروژن، محافظت در برابر تنش اکسیداتیو و تنظیم فشار اسمزی به اثبات رسیده است (Song *et al*., 2010). در پاسخ به تنش‌های محیطی اغلب تولید گابا افزایش می‌یابد، بنابراین سطح سلولی این آمینو اسید غیر پروتئینی از آمینواسیدهای درگیر در سنتز پروتئین فراتر می‌رود. این وضعیت در تنش کم آبی در پنبه گزارش شده است (Xu *et al*., 2015). مطالعات در گیاهان تحت تیمار گابا نشان از نقش آن به عنوان یک متابولیت مؤثر دارد و کاربرد آن عمدتا در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیر زیستی متمرکز بوده است (Fait *et al*., 2007). در گیاهان در شرایط عادی مقدار گابا موجود در سلول پایین است، اما در پاسخ به برخی شرایط مانند خشکی، شوری و تنش دمای پایین می‌توانند به صورت سریع و زیاد تجمع یابد (Shang *et al*., 2011). در گزارشی آمده که کاربرد گابا در بوته‌های خیار تحت تنش کم‌آبی، سبب بهبود خصوصیات مورفولوژیکی و افزایش میزان عملکرد شده است (Fattolahi *et al*., 2015). همچنین اثرگذاری گابا در القای مقاومت به خشکی در گیاه زعفران (*Crocus sativus*) از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، سبب کاهش اثرات مخرب کم آبی در این گیاه شده است (Sedighi Moshkenani *et al*., 2020). این پژوهش با هدف مطالعه تحمل به تنش کم آبی در سبزی خرفه، با کاربرد غلظت‌های مختلف گاما آمینو بوتیریک اسید بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آن در گلخانه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۹ به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار و در هر تکرار ۱۰ گیاه در گلخانه تحقیقاتی سبزی‌کاری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان صورت گرفت. تیمارهای آزمایش شامل سطوح مختلف گابا (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار) و سطوح تنش کم آبی (۷، ۱۴ و ۲۱ روز یکبار) بودند و در مجموع برای هر واحد آزمایش ۳۰ بوته در نظر گرفته شد. بذرهای خرفه با عمق کشت ۱/۵ سانتی‌متر درون کیسه‌های نشاء با قطر دهانه ۲۲ و ارتفاع ۲۸ سانتی‌متر کشت شدند. آبیاری کیسه‌های نشاء تا زمان جوانه‌زنی بذرها و نیز تا مرحله چهار برگه شدن، یک روز در میان به صورت یکنواخت انجام گرفت. در مرحله چهار برگی، تغذیه گیاهچه‌ها با محلول NPK با نسبت‌های ۲۰:۲۰:۲۰ و با غلظت ۳ گرم بر هزار، جهت تقویت و تحریک رشد انجام شد. تیمار با غلظت‌های مختلف گابا در دو مرحله ۶ و ۱۲ برگی بوته‌های خرفه و بصورت محلول‌پاشی برگی صورت گرفت و اعمال تنش کم آبی در سه سطح شاهد، متوسط و شدید بصورت فواصل آبیاری ۷، ۱۴ و ۲۱ روز یکبار از مرحله شش برگی گیاهان تا پایان آزمایش صورت پذیرفت. بوته‌های خرفه درون گلخانه سبزی‌کاری با شدت نور ۴۶۰۰ فوت کندل و میانگین دمای روزانه و شبانه به ترتیب ۲۷ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد و با رطوبت نسبی ۷۰ درصد در طی ماه‌های فروردین تا خرداد مستقر شدند.

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی

در مرحله گسترش ۵۰ برگ حقیقی که گیاهان ۶۰ روزه بودند، جهت نمونه‌گیری و ارزیابی ابتدا از هر کرت به طور تصادفی تعداد ۱۰ بوته انتخاب و صفات ارتفاع بوته و عملکرد رویشی بر اساس وزن پیکره رویشی تازه گیاه اندازه‌گیری شدند. رطوبت نسبی برگ هم به روش رایج با فرمول ($RWC= F_w – D_w / S_w –D_w ×100$) محاسبه شد (Galmes *et al*., 2007). برای اندازه‌گیری میزان پرولین بافت برگ از روش باتس و همکاران (Bates *et al*., 1973)، برای اندازه‌گیری کربوهیدرات محلول از روش آریگوین و همکاران (Irigoyen *et al*., 1992)، برای تعیین غلظت مالون‌دی‌آلدئید از روش هیث و پاکر (Heath and Packer, 1969)، برای سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز از روش گیانوپولیتیس و ریز (Giannopolitis and Ries, 1977) و برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز از روش چنس و مهلی (Chance and Maehly, 1955) استفاده شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین به روش آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با نرم افزار SAS انجام شد و در نهایت جداول مورد نظر ایجاد شدند.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، اثر گابا در غلظت‌های مختلف و تنش کم آبی بر میزان ارتفاع بوته، در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان ارتفاع بوته در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل

آبیاری ۷ روز (شاهد) و کمترین میزان این صفت در تیمار گابای صفر و فواصل آبیاری ۲۱ روز (شدیدترین سطح تنش) حاصل شد (جدول ۲). تنش کم آبیاری با کاهش پتانسیل آب بافت‌های مریستمی در طول روز باعث نقصان فشار آماس به حدی کمتر از میزان لازم برای بزرگ شدن سلول‌ها می‌گردد (Emam and Avareh, 2005). اندام‌های هوایی حساسیت بیشتری به تنش کم آبی دارند و هر گونه کمبود آب موجب تقلیل بیشتر آماس سلولی، کاهش تقسیم سلولی و توسعه سلولی به خصوص در ساقه و برگ‌ها می‌شود. به همین دلیل اولین اثر محسوس کم آبی روی گیاه را می‌توان از روی کاهش ارتفاع یا اندازه کوچک‌تر برگ‌ها تشخیص داد (Blum, 2005). در تحقیقی گزارش شده است که رقابت بیش از حد بین بوته‌ها برای به دست آوردن آب در تیمارهای تنش خشکی، کاهش تخصیص مواد فتوسنتزی به ساقه را به دنبال داشته که این امر، موجب کوتاه قدی گیاه سیاهدانه شد (Norooz pour and Rezvani moghadam, 2005). کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید ممکن است رشد نهال‌های ذرت (*Zea mays*) را با تحریک تقسیم سلولی و طویل شدن سلولی و یا حفظ تعادل متابولیکی بافت‌های گیاهی افزایش دهد (Kinnersley and Lin, 2000).

عملکرد رویشی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر گابا در غلظت‌های مختلف و تنش کم آبی بر عملکرد رویشی معنی‌دار بود، اثر متقابل فواصل آبیاری و گابا در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان عملکرد رویشی در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۷ روز و کمترین میزان در تیمار شاهد و فواصل آبیاری ۲۱ روز به دست آمد. در میان سطوح مختلف آبیاری در شدیدترین سطح و دور آبیاری ۲۱ روز تحت تأثیر بالاترین غلظت گابا نقصان عملکرد خفیف‌تر از تیمار شاهد و بدون استفاده از گابا بود که نشان از نقش تعدیل کنندگی گابا در بروز اثرات مخرب کم آبی دارد (جدول ۲). گابا، یک اسید آمینه غیر پروتئینی، شامل یک بخش قابل توجهی از آمینواسیدهای آزاد در سلول‌های گیاهی می‌باشد. سیستم‌های آنزیمی ضد اکسیداتیو، عامل بافر در متابولیسم کربن و نیتروژن، مقابله با استرس اکسیداتیو و انتقال سیگنال نقش اصلی گابا می‌باشند، که ممکن است منجر به بهبود کارایی کل گیاهان شود (Kinnersley and Lin, 2000).

رطوبت نسبی برگ

بر اساس جدول تجزیه واریانس، اثر گابا در غلظت‌های مختلف و شرایط تنش کم آبی بر رطوبت نسبی برگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان این صفت در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۷ روز و کمترین میزان در تیمار شاهد و فواصل آبیاری ۲۱ روز بود (جدول ۲). کاهش محتوای نسبی آب برگ یکی از مهم‌ترین اثرات تنش کم آبیاری می‌باشد که این صفت به عنوان یکی از روش‌های قابل اطمینان جهت اندازه‌گیری تحمل به خشکی در گیاهان گزارش شده است (Inanlufar *et al*., 2012). گیاهان چند ساله چچم (*Lolium persicum*) تیمار شده با گاما آمینو بوتیریک اسید در معرض تنش کم آبیاری دارای رطوبت نسبی برگ بالاتری در مقایسه با گیاهان شاهد بودند (Krishnan *et al*., 2013).

پرولین برگ

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داده که اثر گابا در غلظت‌های مختلف و تنش کم آبی باعث ایجاد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد در میزان پرولین داده‌ها گردید (جدول ۱). بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان پرولین در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۲۱ روز و کمترین میزان در تیمار شاهد و فواصل آبیاری ۷ روز مشاهده شد (جدول ۲). انباشت پرولین نقش بسیار مؤثری در تطابق و سازگاری گیاه با شرایط خشکی دارد. پرولین به عنوان یک اسمولیت سازگار کننده نقش مهمی در تنظیم اسمزی درون سلولی، پایدار کردن ساختار پروتئین‌ها و غشاء سلولی و نیز جاروب کردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن دارد (Wang *et al*., 2014). گابا در توتون (*Nicotiana rustica*) در مقایسه با پرولین توانایی بیشتری در از بین بردن هیدروژن پراکسیداز در شرایط تنش آبی دارد (Liu *et al*., 2011). افزایش مقدار پرولین در اثر تنش اسمزی در ذرت (Efeoglu *et al*., 2009) و سورگوم (*Sorghum bicolor*) (Manivannan *et al*., 2007) گزارش شده که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. پرولین به دلیل محافظت غشای تیلاکوئید از آسیب اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) نیز اهمیت دارد (Delauney and Verma, 1993). میوه‌های هلوی تیمار شده با گابا میزان پرولین بیشتری داشتند (Shang *et al*., 2011).

قندهای محلول

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر گابا در غلظت‌های مختلف و تنش کم آبی بر میزان قندهای محلول برگ، در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). بر اساس نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان این کربوهیدرات‌ها در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۲۱ روز و کمترین میزان آن در تیمار شاهد و فواصل آبیاری ۷ روز حاصل شد (جدول ۲). به طوری که شرایط تنش کم آبیاری سبب افزایش محتوای کربوهیدرات گردیده است. میزان کربوهیدرات محلول از عوامل بسیار مهم در تنظیم اسمزی بوده است. متابولیت‌هایی مانند گابا و سایر قندها، قندهای

الکلی مانند سوربیتول و مانیتول، اسیدهای آمینه و آمین‌ها، تحت تنش خشکی در گونه‌های گیاهی مختلف تجمع می‌یابند (Javanmardi *et al*., 2010). گزارش شده است، افزایش غلظت کربوهیدرات‌های محلول در شرایط تنش به منظور تنظیم اسمزی و ادامه جذب آب به گیاه می‌باشد (Virgona and Barlow, 1991).

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در گیاه خرفه تحت تیمار گابا در شرایط تنش کم آبی

Table 1- The ANOVA results for the measured traits in *Portulaca oleracea* under GABA treatment in water deficit stress

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی Df	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد رویشی Vegetative yield (g.plant-1 FW)	رطوبت نسبی Relative Water Content (%)	پرولین Proline (µM.g-1 FW)	قندهای محلول Soluble sugars (mg.g-1 FW)	مالون‌دی آلدئید Malon-di-aldehyde (µg.g-1 FW)	سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase (unit. g-1protein)	کاتالاز Catalase (unit. g-1protein)
Replicate تکرار	2	2.01 ns	54751.42 ns	56.44 ns	0.56ns	12.78	6.35 ns	10.33 ns	8.04 ns
فواصل آبیاری Irrigation intervals	2	110.78*	973512.06*	2423.5**	0.347*	781.53*	1234.11*	678.43**	309.89*
خطای اصلی Main Error	4	14.66	12876.87	10.76	0.043	11.05	9.87	7.56	9.78
GABA گابا	2	56*	73247.67*	198.08*	0.021*	137.02*	123.08*	85.03*	56.34*
Irrigation intervals ×GABA	4	49.34*	11270.43*	68.73**	0.009**	17.68*	37**	20.34**	7.28**
Error خطا	12	17.63	26503.88	43.14	0.014	7.90	14.34	13.14	7.25
ضریب تغییرات C.V (%)	-	14.46	6.66	12.25	6.87	5.65	11.77	10.94	6.27

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ns: عدم معنی‌داری.

ns, * , **: Non-significant and significant at 5 and 1% of probability levels, respectively.

مالون‌دی‌آلدئید

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۱)، اثر گابا در غلظت‌های مختلف و شرایط تنش کم آبی بر میزان مالون‌دی‌آلدئید، در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شده است. بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین میزان این صفت در تیمار شاهد به دست آمد (جدول ۲). غلظت بالای گابا باعث کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید و در نتیجه کاهش خسارات ناشی از آن شد. در اثر تنش کم آبیاری، رادیکال‌های آزاد ایجاد شده سبب آسیب به غشاء سلولی شده و در اثر این آسیب، غشای لیپیدها تخریب شده و مالون‌دی‌آلدئید به بیرون نشت می‌کند. رادیکال‌های آزاد اکسیژن با پراکسیداسیون اسیدهای چرب اشباع، آلدئیدهایی مانند مالون‌دی‌آلدئید تولید می‌کنند که این محصولات آلدئیدی معمولاً به عنوان شاخص تنش اکسایشی اندازه‌گیری می‌شوند (Shulaev and Oliver, 2006). گیاهان چند ساله چچم (*Lolium persicum*) تیمار شده با گابا در معرض تنش خشکی دارای میزان مالون‌دی‌آلدئید پایین‌تر در مقایسه با گیاهان شاهد بودند (Krishnan *et al*., 2013). پیش از این نیز گزارش شده بود که گابا باعث کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید و کاهش درصد نشت یونی در میوه‌های موز (*Musa sapientum*) ذخیره شده در انبار شد. پیشنهاد شده که گابا از تجمع مالون‌دی‌آلدئید در شرایط تنش جلوگیری می‌کند (Wang *et al*., 2014). اثر حفاظتی گابا بر یکپارچگی غشاء سلولی با کنترل پراکسیداسیون لیپید نیز مشاهده شد (Song *et al*., 2010). گابا نقش مولکول سیگنالینگ در غلظت‌های پایین را داشته و در غلظت‌های بالاتر نقش خود را در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی، متابولیکی، متابولیسم نسبت کربن به نیتروژن (C/N)، تنظیم اسمزی و حفاظت گیاهان در برابر آسیب‌های اکسیداتیو به نمایش بگذارد (Bouche and Fromm, 2004).

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

نتایج این تحقیق نشان داد، اثر گابا در غلظت‌های مختلف و تنش کم آبی بر میزان فعالیت این آنزیم، در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۱). همان طور که در جدول مقایسه میانگین‌ها دیده می‌شود، بیشترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۱۴ روز و کمترین میزان در تیمار

شاهد و فواصل آبیاری ۷ روز یکبار به دست آمد (جدول ۲). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به عنوان مکانیسم دفاعی اولیه در برابر رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌باشد (Asada, 1999). همان طور که در نتایج ملاحظه شد میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش یافت که با توجه به نقش آن در تعدیل رادیکال سوپراکسید، این افزایش توجیه پذیر است. مهم‌ترین پاسخ حفاظتی ژنوتیپ‌های گیاهی در القای مقاومت به تنش در اختلاف فعالیت دفاع آنزیمی و غیر آنزیمی می‌باشد (Abdel-Monaim, 2013). گیاهان ذرت تیمار شده با گابا فعالیت سوپراکسید دیسموتاز بیشتری داشتند. بروز فعالیت‌های بیشتر آنتی‌اکسیدان‌ها ناشی از کاربرد گابا برای بهبود توانایی گیاهان در برابر استرس اکسیداتیو حیاتی است (Shi *et al*., 2010).

جدول ۲- صفات کمی و کیفی خرفه تحت تأثیر فواصل آبیاری و تیمار گابا

Table 2- The quantitative and qualitative traits of *Portulaca oleracea* under the influence of irrigation intervals and GABA treatment

فواصل آبیاری Irrigation intervals (Day)	گابا GABA (mM)	ارتفاع بوته Plant height (cm)	عملکرد رویشی Vegetative yield (g.plant^{-1} FW)	رطوبت نسبی Relative water content (%)	پرولین Proline (µM.g^{-1} FW)	قندهای محلول Soluble sugars (mg.g^{-1} Fw)	مالون‌دی آلدئید Malon-di-aldehyde (µg.g^{-1} FW)	سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase (unit. g^{-1}protein)	کاتالاز Catalase (unit. g^{-1}protein)
7	0	15.34 ^{e}	1110.8 ^{c}	93 ^{c}	0.46 ^{i}	22 ^{i}	0.33 ^{g}	18 ^{i}	4.7 ^{e}
	20	21.36 ^{b}	1563.5 ^{ab}	95 ^{b}	0.50 ^{h}	30 ^{f}	0.27 ^{h}	21 ^{h}	2.8 ^{h}
	40	26.54 ^{a}	1720.8 ^{a}	99 ^{a}	0.52 ^{g}	33 ^{e}	0.21 ^{i}	24 ^{f}	2.3 ^{i}
14	0	12.25 ^{h}	885.2 ^{e}	81 ^{f}	0.63 ^{f}	27 ^{g}	0.49 ^{b}	23 ^{g}	4.3 ^{f}
	20	16.26 ^{d}	1099.5 ^{cd}	84 ^{e}	0.71 ^{e}	37 ^{d}	0.41 ^{e}	29 ^{d}	5.4 ^{c}
	40	17.90 ^{c}	990.4 ^{d}	86 ^{d}	0.75 ^{d}	39 ^{c}	0.37 ^{f}	41 ^{a}	5.8 ^{b}
21	0	9.45 ^{i}	6353.5 ^{h}	68 ^{i}	0.79 ^{c}	25 ^{h}	0.61 ^{a}	27 ^{e}	3.7 ^{g}
	20	13.18 ^{g}	6855.2 ^{g}	74 ^{h}	0.82 ^{b}	41 ^{b}	0.46 ^{c}	34 ^{c}	5.2 ^{d}
	40	14.47 ^{f}	7834.6 ^{f}	79 ^{g}	0.89 ^{a}	46 ^{a}	0.41 ^{d}	36 ^{b}	6 ^{a}

در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد آزمون چنددامنه‌ای دانکن فاقد اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

In each column, the means followed by at least one common letter, are not statistically different based on Duncan's multiple range test at 5% of probability level.

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج این تحقیق نشان داد که اثر گابا در غلظت‌های مختلف و تنش کم آبی بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز، در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). همان طور که در جدول مقایسه میانگین‌ها دیده می‌شود، بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۲۱ روز و کمترین میزان در تیمار گابا ۴۰ میلی‌مولار و فواصل آبیاری ۷ روز بود (جدول ۲). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش تنش خشکی میزان فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش می‌یابد به علت این که این آنزیم مسئول حذف بخش عظیمی از مولکول‌های پراکسید هیدروژن (H_2O_2) است (Eyidogan and Tufanoz, 2007). غلظت بالا و سمی رادیکال‌های فعال اکسیژن باعث آسیب شدید به غشاء سلولی و ساختارهای پروتئینی، مهار فعالیت آنزیم‌های متعدد از مسیرهای متابولیک و در نتیجه اکسیداسیون ماکرومولکول‌هایی از جمله چربی‌ها و DNA می‌باشد، بنابراین باعث مرگ ناگهانی سلول می‌شود (Gill and Tuteja, 2010). گابا فعالیت‌های مختلف آنتی‌اکسیدان‌ها را برای از بین بردن گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در گیاهان *Caragana intermedia* تغییر داد (Shi *et al*., 2010).

نتیجه‌گیری

نتایج این بررسی حاکی از آن است که گابا به میزان زیادی قادر است تنش اکسیداتیو ناشی از کم آبی را در سبزی خرفه تخفیف دهد. این اثر هم در مورد پارامترهای رویشی و عملکرد و هم در مورد پارامترهای اکسیداتیو چون فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاملا مشهود می‌باشد. در واقع کاربرد برخی ترکیبات زیستی مانند گابا، از طریق افزایش خاصیت تنظیم‌کنندگی اسمزی، افزایش مانور و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش درصد نشت یونی و افزایش تحمل به خشکی در برخی گونه‌های گیاهی از جمله خرفه در شرایط تنش خشکی یا کم‌آبی می‌شود. در این پژوهش غلظت ۴۰ میلی‌مولار گابا در تخفیف اثرات کم آبیاری بر اکثر پارامترهای مورد ارزیابی مؤثرترین تیمار بود. در نهایت نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب

زیستی گابا باعث تحمل گیاه خرفه در مقابل تنش کم آبی می‌شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از اعضای هیات علمی و پرسنل محترم پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان که ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند، صمیمانه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

1. Abdel-Monaim, M.F. (2013). Improvement of biocontrol of damping-off and root rot/wilt of faba bean by salicylic acid and hydrogen peroxide. *Journal of Mycobiology 41*(5): 47-55. (In Persian with English abstract). https://doi:10.5941/MYCO.2013.41.1.47
2. Afshar, M., Tarzi, B., Gharachoorloo, M., & Bakhoda, H. (2006). Evaluation and comparison of chemical compounds and fatty acids in the leaves of two samples of Iranian *portulaca oleraceae* belonging to the north and south. *Food Science and Nutrition Journal 3*(1): 59-64. (In Persian with English abstract)
3. Asada, K. (1999). The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygen and dissipation of excess photons. *Journal of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 50*(1): 601-639. https://doi: 10.1146/annurev.arplant.50.1.601.
4. Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Journal of Plant and Soil 39*(1): 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060.
5. Blum, A. (2005). Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. *Australian Journal of Agricultural Research 56*(1): 1159-1168. https://doi:10.1071/AR05069.
6. Bouche, N., & Fromm, H. (2004). GABA in plants: just a metabolite. *Trends Plant Science 9*(1): 110-115. https://doi:10.1016/j.tplants.2004.01.006.
7. Chance, B., & Maehly, A.C. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology 2*(1): 764-775. http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8.
8. Chevone, B.I., Seiler, J.R., Melkonian, J., & Amundson, R.G. (1990). Ozone-water stress interactions, adaptation and acclimation mechanisms. (ed. by Ruth G. Alscher, Jonathan R. Cumming). Wiley-Liss, U.S.A. *Plant Biology Stress Responses in Plants 21*(1): 311-328.
9. Delauney, A.J., & Verma, D.P.S. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *Plant Journal 4*(2): 215-223. https://doi:10.1046/j.1365-313X.1993.04020215.x.
10. Efeoglu, B., Ekmekci, Y., & Cicek, N. (2009). Physiological responses of three maize cultivars to drought. *Journal of Phytotherapy Research 16*(3): 240-244.
11. Emam, Y., & Avareh, M. (2005). *Drought tolerance in higher plants*. Tehran University Publishing Center Publication 186. (In Persian)
12. Eyidogan, F., & Tufanoz, M. (2007). Effect of salinity on antioxidant responses of chickpea seedlings. *Journal of Acta Physiologia Plantarum 29*(1): 485-493. https://doi:10.1007/s11738-007-0059-9.
13. Fait, A., Fromm, H., Walter, D., Galili, G., & Fernie, A. (2007). Highway or byway: the metabolic role of the GABA shunt in plants. *Elsevier Ltd 13*(1): 9-14. https://doi:10.1016/j.tplants.2007.10.005.
14. Fattolahi, A., Ghahremani, Z., Barzegar, T., & Safari, M. (2015). Effect of GABA on Morphological indices of Cucumber cultivars under dehydration. *Third Conference on New Findings in Environment and Agricultural Ecosystems 3*(1): 139-148.
15. Galmes, J., Flexas, J., Save, R., & Medrano, H. (2007). Water relations and stomatal characteristics of Mediterranean plants with different gowth forms and leaf habits. Responses to water stress and recovery. *Journal of Plant Soil 290*(1): 139-155. https://doi:10.1007/s11104-006-9148-6.
16. Giannopolitis, C.N., & Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutase, occurrence in higher plants. *Journal of Plant Physiology 59*(2): 309-314. https://doi:10.1104/pp.59.2.309.
17. Gill, S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry 48*(12): 909-930. https://doi:10.1016/j.plaphy.2010.08.016.
18. Hasandokht, M. (2012). Vegetable production technology. *Selseleh Publication*. (In Persian)
19. Heath, R.L., & Packer, L. (1969). Photoperoxidation in isolated chloroplast. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Journal of Biochemistry and Biophysiology 125*(1): 189-198. https://doi:10.1016/0003-9861(68)90654-1.
20. Inanlufar, M., Omidi, H., & Pazoki, A. (2012). Morphological, agronomical changes and oil content in Purslane (*Portulaca oleracea*) under drought stress and biological/chemical fertilizer of nitrogen. *Journal of Medicinal Plants 12*(48):170-184. (In Persian with English abstract) https://doi:20.1001.1.2717204.2013.12.48.17.4.
21. Irigoyen, J.J., Emerich, D.W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Journal of Plant Physiology 84*(1): 55-60. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x.

22. Jami-al-ahmadi, M., Kafi, M., & Nasiri Mahalati, M. (2004). Salinity effects on germination properties of *Kochia scoparia*. *Iranian Journal of Field Crops Research 2*(2): 151-159. (In Persian with English abstract)
23. Javanmardi, Sh., Fotovat, R., & Saba, J. (2010). relationship between osmotic adjustment with soluble carbohydrates and proline and role of osmotic adjustment in grain yield of wheat lines under drought stress. *Journal of Agricultural Science and Technology 14*(53): 65-73. (In Persian with English abstract). https://doi:20.1001.1.24763594.1389.14.53.6.3.
24. Kinnersley, A.M., & Lin, F. (2000). Receptor modifiers indicate that γ-aminobutyric acid (GABA) is a potential modulator of ion transport in plants. *Journal of Plant Growth Regulators 32*(1): 65-76. https://doi.org/10.1023/A:1006305120202.
25. Krishnan, S., Laskowski, K., Shukla, V., & Merewitz, E. (2013). Mitigation of drought stress damage by exogenous application of a non-protein amino acid γ–aminobutyric acid on perennial ryegrass. *Journal of Plant, Soil, and Microbial Sciences 138*(5): 358-366. https://doi:10.21273/JASHS.138.5.358.
26. Liu, C.L., Zhao, L., & Yu, G.H. (2011). The dominant glutamic acid metabolic flux to produce gamma-amino butyric acid over proline in *Nicotiana tabacum* leaves under water stress relates to its significant role in antioxidant activity. *Journal of Integrative Plant Biology 53*(8): 608-618. https://doi:10.1111/j.1744-7909.2011.01049.x.
27. Manivannan, P., Jaleel, C.A., Sankar, B., Kishurekumar, A., Lakshmanan, G.M., & Panneerselvam, R. (2007). Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Journal of Colloids and Surfaces, Biointerfaces 59*(2): 141-149. https://doi:10.1016/j.colsurfb.2007.05.002.
28. Monakhova, O.F., & Chernyadev, I. (2002). Protective role of kartolin-4 in wheat plants exposed to soil drought. *Applied Biochemistry and Microbiology 38*(4): 373-380. https://doi:10.1023/A:1016243424428.
29. Norooz pour, Gh., & Rezvani moghadam, P. (2005). The effect of different irrigation intervals and plant density on oil yield and essential oil of black seed (*Nigella sativa* L.). *Journal of Research and Construction in Agriculture and Horticulture 3*(2): 305-315. (In Persian with English abstract). https://doi:10.22067/gsc.v3i2.1313.
30. Okafor, I.A., Ayalokunrin, M.B., & Orachu, L.A. (2014). A review on *Portulaca oleracea* (purslane) plant-its nature and biomedical benefits. *International Journal of Biomedia Research 5*(2): 75-80. https://doi.org/10.7439/ijbr.v5i2.462.
31. Sedighi Moshkenani, F., Niknam, V., Sharifi, G., & Seifi Kalhor, M. (2020). An investigation of GABA effect on drought stress tolerance improvement in cultivated saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Plant Process and Function 9*(39): 29-50. (In Persian with English abstract). https://doi:20.1001.1.23222727.1399.9.39.10.9.
32. Shang, H., Cao, S., Yang, Z., Cai, Y., & Zheng, Y. (2011). Effect of exogenous γ-aminobutyric acid treatment on proline accumulation and chilling injury in peach fruit after long-term cold storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry 59*(4): 1264-1268. https://doi:10.1021/jf104424z.
33. Shi, S.Q., Shi, Z., Jiang, Z.P., Qi, L.W., Sun, X.M., & Li, C.X. (2010). Effects of exogenous GABA on gene expression of *Caragana intermedia* roots under NaCl stress: regulatory roles for H_2O_2 and ethylene production. *Journal of Plant, Cell Environment 33*(2): 149-162. https://doi:10.1111/j.1365-3040.2009.02065.x.
34. Shulaev, V., & Oliver, D.J. (2006). Metabolic and proteomic markers for oxidative stress. New tools for reactive oxygen species research. *Journal of Plant Physiology 141*(2): 367-372. https://doi:10.1104/pp.106.077925.
35. Song, H., Xu, X., Hua, W., Wang, H., & Tao, Y. (2010). Exogenous γ-aminobutyric acid alleviates oxidative damage caused by aluminium and proton stresses on barley seedlings. *Journal of Science Food Agriculture 90*(9):1410-1416. https://doi.org/10.1002/jsfa.3951.
36. Verbruggen, N., & Hermans, Ch. (2008). Proline accumulation in plants: a review. *Journal of Amino acids 35*(4): 753-759. https://doi:10.1007/s00726-008-0061-6.
37. Virgona, J.M., & Barlow, E.W.R. (1991). Drought stress induces changes in the non-structural carbohydrate composition of wheat stems. *Journal of Functional Plant Biology 18*(3): 239-247. https://doi:10.1071/pp9910239.
38. Wang, Y., Luo, Z., & Huang, H. (2014). Effect of exogenous γ-aminobutyric acid (GABA) treatment on chilling injury and antioxidant capacity in banana peel. *Scientia Horticulturae 168*(4): 132-137. https://doi:10.1016/j.scienta.2014.01.022.
39. Xu, K., Chen, S., Li, T., Ma, X., Liang, X., Ding, X., & Liu, H. (2015). OsGRAS23 a rice GRAS transcription factor gene, is involved in drought stress response through regulating expression of stress responsive genes. *Journal of Plant Biology 15*(13): 141-154. https://doi.org/10.1186/s12870-015-0532-3.